

Model sieci wodociągowej oraz estymacja jego parametrów z wykorzystaniem algorytmów genetycznych

Włodzimierz Stanisławski, Marcin Zmarzły

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej

Artykuł przedstawia proces tworzenia modelu sieci wodociągowej ze szczególnym uwzględnieniem etapu kalibracji. Kalibrację wykonano z użyciem algorytmów genetycznych. Dane kalibracyjne uzyskano z systemu pomiarowego zainstalowanego na rzeczywistym obiekcie wodociągowym.

Słowa kluczowe: modelowanie, EPANET, algorytmy genetyczne, sieć wodociągowa

Obiektem badań jest sieć wodociągowa miasta Kędzierzyn-Koźle. Sieć ta składa się z pompowni wodociągowych, rurociągów przesyłowych wraz z armaturą, a także punktów poboru wody. Sieć wodociągowa stanowi rozproszony układ rurociągowy, którego długość na terenie Kędzierzyna-Koźla wynosi 153 km, a kolejne 74 km stanowią przyłącza wodociągowe. Największą średnicę (500 mm) ma rurociąg tranzytowy łączący Kędzierzyn z Koźlem. Sieć wodociągowa jest zbudowana głównie z rur żeliwnych i PCV, a przyłącza z rur stalowych ocynkowanych i PE. W ostatnich latach dużą popularność zdobył materiał PE i wszystkie nowe przyłącza (jak również większość sieci) buduje się z PEHD. Rozwój wodociągów jest ściśle związany z rozwojem miasta; i w najbliższych latach będą podlegały modernizacji ujęcia i stacje wodociągowe, a remontom i wymianie istniejące sieci i przyłącza wodociągowe. Narzędziem, które wykorzystano do wykonania modelu sieci jest EPANET2.

EPANET2 [1] to oprogramowanie inżynierskie umożliwiające:

- ✓ symulację zmian warunków hydraulicznych przepływu wody w sieci projektowanej oraz już istniejącej
- ✓ obliczanie ilości energii zużywanej przez pompy zainstalowane na sieci
- ✓ analizę wybranych parametrów jakości wody
- ✓ przyjazny dla użytkownika sposób wczytywania większości danych i wizualizacji wyników.

Symulacja pracy systemu zaopatrzenia w wodę wykonana za pomocą tego programu dostarcza wiele informacji o sposobie jego funkcjonowania, jednak należy zwrócić uwagę na fakt, że program jest bardzo wrażliwy zarówno na zadawane wartości początkowe jak i warunki brzegowe.

Proces tworzenia modelu sieci

Podstawowym źródłem dla tworzonego szkieletu sieci jest mapa elektroniczna wykonana w systemie Autodesk MapGuide. Mapa ta jest dostępna i wykorzystywana przez pracowników zakładu wodociągów i kanalizacji. Charakteryzuje się tym, iż na podstawie zawartych w bazie informacji wektorowych generuje rastrowy obraz w dowolnej przeglądarce internetowej użytkownika (jeżeli zainstalowano odpowiednią wtyczkę). Interfejs użytkownika umożliwia wybór różnych

warstw, np. dzielnice, ulice, budynki, magistrale wodociągowe, sieć zasadnicza, przyłącza i inne.

Digitalizacja mapy została wykonana w całości w programie EPANET2 przez wykorzystanie opcji tła sieci (*backdrop*). Cały raster został precyzyjnie przeskalowany, wskutek czego możliwe stało się wykorzystanie opcji automatycznego mierzenia długości linii (*autoLength on/off*). Digitalizacja polegała na naniesieniu wszystkich węzłów sieci (*junctions*) oraz połączeniu ich prostymi (*lines*) lub łamanymi (*lines w. vertices*), pamiętając o określeniu średnicy (*diameter*) danego połączenia (rys. 1).



Rys. 1. Widok sieci wodociągowej po digitalizacji z podłożym podkładem (*backdrop*)

Fig. 1. Map view of the water supply system after digitization with background (*backdrop*) enabled

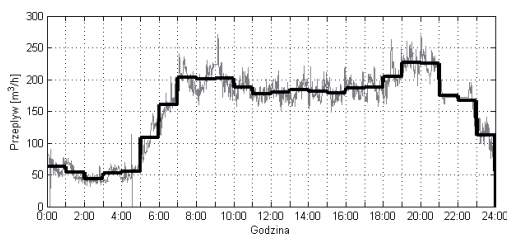


Rys. 2. Model symulacyjny po wprowadzeniu bazowych wartości zapotrzebowania dla odbiorców

Fig. 2. The simulation model after entering base demand values

Sieć zawiera 1244 węzły oraz 1439 odcinków rur (licząc jedynie rury o średnicy większej niż 50 mm, położone na terenie administracyjnym miasta). Teren pokryty siecią mieści się w prostokącie o wymiarach 6392 × 12322 m (nie licząc odbiorców hurtowych w postaci gmin ościennych). Miasto liczy około 64 tys. mieszkańców, ma powierzchnię 123,4 km². Woda uzdatniana jest w dwóch punktach miasta (w Zakładzie Uzdatniania Wody – ZUW i w Stacji Uzdatniania Wody – SUW). Oprócz ZUW i SUW istnieją dodatkowo dwie przepompownie podnoszące ciśnienie w odległych częściach miasta. Podczas normalnej pracy wodociągu najdłuższy odcinek, jaki ma do pokonania woda, to prawie 7,1 km – od SUW w kierunku wschodnim do przepompowni, oraz odcinek od ZUW w kierunku północno-zachodnim – ponad 5,9 km. Średnice magistral mieszczą się w przedziale od 100 mm do 500 mm. Sumaryczna długość odcinków rur o średnicach większych niż 50 mm wynosi ponad 155 km. Miasto leży na terenie równinnym, mimo to istnieje różnica poziomów wynosząca ponad 30 m.

Każdy z węzłów z niezerową wartością współczynnika bazowego zapotrzebowania (*base demand*) został przekonfigurowany tak, aby korzystał z 24-godzinnej rozkładu zapotrzebowania (*pattern*) (rys. 3). Jednym z powodów była konieczność przemnożenia zapotrzebowania bazowego (będącego wartością całkowitą) przez ułamek umożliwiający przeskalowanie do wartości rzeczywistej (rys. 2).



Rys. 3. Wyznaczony rozkład 24-godzinny zapotrzebowania oraz 1440-minutowa produkcja wody

Fig. 3. The 24-hour distribution of demand and the water production in 1440 minutes

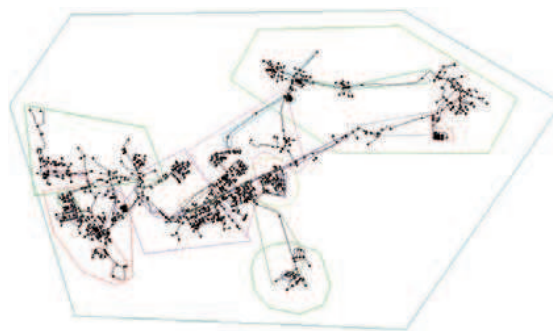
Drugim powodem zastosowania 24-godzinnych (oraz alternatywnie 1440-minutowych) rozkładów była możliwość uwzględnienia czasowych zmian ciśnienia oraz przepływu w sieci.

Ostateczna wersja aplikacji generującej rozkład dobowy uwzględnia przepływy zarówno z ZUW, jak i z SUW. Po ustawieniu parametru *elevation* (wysokości geograficznej danego punktu względem punktu odniesienia), w każdym z węzłów ciśnienie w modelu sieci znacznie zbliżyło się do wartości rzeczywistych.

Estymacja parametrów modelu

Estymacja parametrów modelu wśród użytkowników sieci wodociągowych nazywana jest kalibracją. Do kalibracji sieci wykorzystano zaimplementowany w EPANET2 algorytm genetyczny [2, 3, 4]. Istnieje kilka sposobów użycia algorytmu genetycznego sprzężonego ze środowiskiem EPANET2. Można skorzystać z dedykowanych wtyczek, użyć udostępnianej biblioteki programów, wykorzystać mostek do środowiska MATLAB. W pracy zdecydowano się wybrać najlepiej udokumentowane rozwiązanie – wtyczkę EPANET Calibrator, opracowaną przez Resan Labs z Brazylii. Rozwiązanie to

pozwala w poprawny, powtarzalny sposób optymalizować parametry elementów składowych modelu, na wyjściu dając plik, który można z powodzeniem dalej analizować w środowisku EPANET2. Praca ze wspomnianą wtyczką składa się z kilku etapów. Na wstępie przygotowaną wcześniej sieć należy podzielić na rejony, w których optymalizowany parametr ma jednakową wartość (rys. 4). Przykładowo, jeżeli optymalizowany będzie parametr *roughness* (szorstkość rur), należy zaznaczyć rejony, w których wiek sieci oraz materiał, jakiego użyto do jej budowy, jest taki sam. Jednocześnie obowiązuje zasada, że odcinek leżący wewnątrz kilku rejonów należy do pierwszego z nich. Dlatego tworzenie rejonów rozpoczęto od magistral oraz jednorodnych fragmentów sieci, a zakończono zakreślając całe dzielnice i ostatecznie całą sieć.

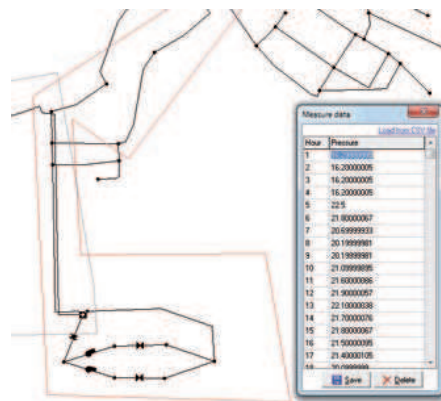


Rys. 4. Rejony tworzone z wykorzystaniem EPANET Calibrator

Fig. 4. Regions created using EPANET Calibrator

Po utworzeniu rejonów, można przystąpić do kolejnego etapu – wprowadzania wartości pomiarowych. Dla algorytmu genetycznego pełnią one rolę wartości wzorcowych. EPANET Calibrator obsługuje dwa rodzaje danych wejściowych procesu optymalizacji genetycznej: ciśnienie w węzle oraz przepływ w odcinku sieci. Wtyczka udostępnia specjalny interfejs (rys. 5), w którym można wprowadzić wartości danych w kolejnych jednostkach czasu lub zaimportować je z wcześniej przygotowanego pliku CSV. Po uruchomieniu optymalizacji algorytm modyfikuje parametry elementów sieci tak, aby uzyskać przebiegi jak najbardziej zbliżone do wprowadzonych danych wzorcowych.

Kolejno wprowadzono dane godzinowe ciśnienia wszystkich sześciu punktów pomiarowych PC1–PC6, ciśnienia tłoczenia ZUW i SUW, ciśnienia ssania obu przepompowni oraz prze-



Rys. 5. Fragment interfejsu wtyczki EPANET Calibrator, służący do wprowadzania danych wzorcowych

Fig. 5. EPANET Calibrator interface for loading the measured reference data

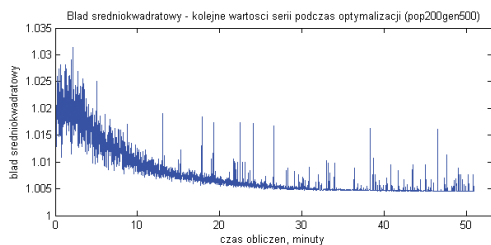


Rys. 6. Lokalizacja punktów pomiarowych
Fig. 6. Localization of measurement points

pływy mierzone na wypływie do sieci z ZUW i SUW oraz na wypływie do przepompowni (rys. 6).

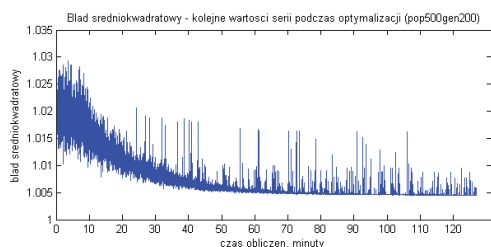
W środowisku MATLAB opracowano program umożliwiający automatyczne generowanie stosownych plików CSV na podstawie danych źródłowych, pobieranych z pliku jednodniowego eksportu, z archiwum systemu monitorującego pracę obiektu.

Aby jak najlepiej wykorzystać możliwości algorytmu genetycznego, przeprowadzono analizę jego skuteczności dla różnych wartości parametrów konfiguracyjnych. W pierwszej kolejności porównano zysk wynikający ze zwiększenia liczebności populacji oraz liczby pokoleń. Na rys. 7 przedstawiono postęp algorytmu genetycznego dla populacji złożonej z 200 osobników oraz 500 pokoleń, natomiast na rys. 8 – dla 500 osobników i 200 pokoleń.



Rys. 7. Przebieg błędu średniokwadratowego (MSE) podczas procesu optymalizacji (200 osobników, 500 pokoleń)

Fig. 7. Mean Square Error (MSE) during the optimization process (population = 200, generations = 500)



Rys. 8. Przebieg błędu średniokwadratowego (MSE) podczas procesu optymalizacji (500 osobników, 200 pokoleń)

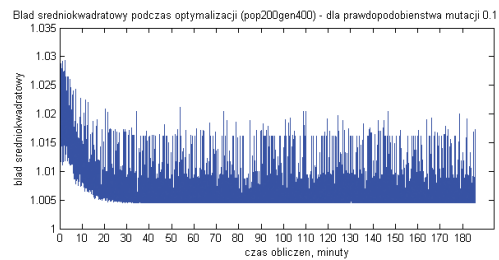
Fig. 8. Mean Square Error (MSE) during the optimization process (population = 500, generations = 200)

Na rys. 7 i 8 można zauważyć, że zwiększenie liczby osobników dla algorytmu genetycznego nie oznacza lepszych oraz szybszych wyników obliczeń. Dla 200 osobników satysfakcjonujący wynik uzyskuje się już około w czterdziestej minucie obliczeń, podczas gdy dla 500 osobników dopiero w sześć-

dziesiątej minucie. Niezaprzeczną zaletą większej liczebności populacji jest poszerzenie zakresu poszukiwań, przy jednoczesnym zachowaniu zbieżności algorytmu do ostatecznego wyniku.

Na przebieg algorytmu genetycznego ma także istotny wpływ prawdopodobieństwo mutacji. Większa wartość prawdopodobieństwa powoduje, że algorytm genetyczny przeszukuje przestrzeń rozwiązań znacznie bardziej dynamicznie i szybko minimalizuje błąd. Niestety, pojedyncze osobniki znacznie odbiegają od rozwiązania optymalnego

Przy mniejszej wartości prawdopodobieństwa algorytm co prawda działa wolniej, lecz daje wynik zbliżony do optymalnego. Na podstawie eksperymentów (rys. 9) stwierdzono, że najlepsza wartość prawdopodobieństwa mutacji wynosi 0,01.



Rys. 9. Przebieg procesu optymalizacji dla prawdopodobieństwa mutacji równego 0,1

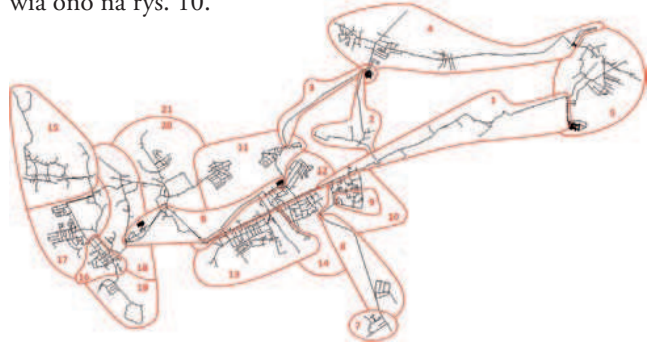
Fig. 9. The optimization process, with the mutation probability = 0.1

Przed uruchomieniem obliczeń wprowadzono dodatkowe korekty modyfikując parametr *elevation* węzłów, w których realizowano pomiary. Następnie zresetowano ustawienie parametru *roughness* wszystkich połączeń do wartości domyślnej 0,1 oraz parametru *emitters* wszystkich węzłów do wartości 0,04. Na tym etapie nie jest potrzebne precyzyjne określenie ich wartości, gdyż będą one modyfikowane algorytmem genetycznym.

Tak przygotowaną sieć podzielono na rejony, które zostały ustalone w serii konsultacji z pracownikami i kierownictwem firmy. Podstawowymi czynnikami decydującymi o liczbie i zasięgu poszczególnych rejonów oraz o przynależności określonych odcinków/węzłów sieci do danego rejonu były:

- ✓ wiek danego fragmentu sieci; okres w jakim powstał
- ✓ materiał, z jakiego wytworzono elementy infrastruktury.

Uzyskane informacje o podziale sieci na rejony przedstawia ono na rys. 10.



Rys. 10. Sieć z podziałem na rejony

Fig. 10. Network divided into regions

Na przygotowanym w ten sposób modelu sieci, przy użyciu zdefiniowanych rejonów, uruchomiono optymalizację algorytmem genetycznym skonfigurowanym według następujących ustawień:

- ✓ liczebność populacji = 200
- ✓ liczba pokoleń = 400
- ✓ prawdopodobieństwo mutacji = 0,01
- ✓ prawdopodobieństwo krzyżowania = 0,9
- ✓ parametr modyfikowany = *emitters* (nieszczelność węzła)
- ✓ parametr optymalizowany = *pressure* (ciśnienie sieciowe) w 10 predefiniowanych punktach sieci.



Rys. 11. Sieć z podziałem ze względu na wartość parametru *emitters* wyznaczonego przez algorytm genetyczny

Fig. 11. Network divided into areas of the same *emitters* parameter value, calculated by the genetic algorithm

Otrzymane w wyniku optymalizacji wartości parametru *emitters* węzłów z poszczególnych stref przedstawia rys. 11. Węzły leżące w obszarach bez oznaczeń literowych mają wartość *emitters* = 0,00. Węzły leżące w obszarach z oznaczeniami literowymi mają wartość *emitters* równą odpowiednio: A) 0,092808, B) 0,150905, C) 0,364761, D) 0,043588, E) 0,060599, F) 0,192074, G) 0,457994, H) 0,500000, I) 0,003275.

Po optymalizacji wartość błędu średniokwadratowego uległa znacznemu zmniejszeniu, co przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Wartość błędu średniokwadratowego przed i po optymalizacji algorytmem genetycznym

Tab. 1. Mean Square Error (MSE) value before and after the optimization using genetic algorithm

Lokalizacja	Parametr	Błąd średniokwadratowy przed optymalizacją	Błąd średniokwadratowy po optymalizacji
ZUW	Ciśnienie sieciowe	0,3104	0,2767
SUW	Ciśnienie sieciowe	0,7968	5,4206
PC 1	Ciśnienie sieciowe	1,5688	0,4892
PC 2	Ciśnienie sieciowe	6,5923	1,0097
PC 3	Ciśnienie sieciowe	1,1115	0,5122
PC 4	Ciśnienie sieciowe	10,7789	1,9766
PC 5	Ciśnienie sieciowe	11,2838	0,9033
PC 6	Ciśnienie sieciowe	8,4838	0,9485
Przepompownia Cisowa	Ciśnienie ssania	10,1014	2,7899
Przepompownia Sławięcice	Ciśnienie ssania	15,5286	1,7254
Suma błędów średniokwadratowych		66,5563	16,0523

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych analiz opracowanego modelu symulacyjnego można sformułować następujące wnioski:

- ✓ proces estymacji parametrów wymaga współpracy z ekspertem na wszystkich etapach tworzenia modelu
- ✓ umiejętnie zastosowane algorytmy genetyczne mogą znacząco poprawić jakość modelu.

Faza przygotowania struktury sieci w modelu jest zadaniem niezwykle czasochłonnym – można ten proces znacznie skrócić, redukując poziom szczegółowości sieci, wówczas jednak trudniej jest zachować dobry poziom zgodności modelu z rzeczywistością. Dobrze dopasowany model może posłużyć do racjonalnej gospodarki siecią wodociagową [5], w tym szczególnie do wykrywania wycieków. Do zadań bardziej złożonych realizowanych z wykorzystaniem modelu należy lokalizacja wycieków w sieci. Lokalizacja wycieków może być tutaj realizowana przy pomocy algorytmu genetycznego estymującego parametry *emitters* podczas wycieku. Porównanie tych parametrów z modelowymi może wskazać strefę wycieku.

Bibliografia

1. Rossman L.A.: *EPANET 2 Users Manual*. EPA United States Environmental Protection Agency, Cincinnati 2000.
2. Abe N., Peter B.C.: *Epanet Calibrator – An integrated computational tool to calibrate hydraulic models*. *Integrating Water Systems*. Boxall & Maksimovic (eds), 2010.
3. Projeto, R.L. V.: *EPANET Calibrator. Guia do Usuário*.
4. Abe N., Cheung P.B.: *EPANET Calibrator. User Guide*. 2008.
5. Zimoch I.: *Zastosowanie modelowania komputerowego do wspomagania procesu eksploatacji systemu wodociagowego*. *Ochrona Środowiska* nr 3, 2008.

Water supply network model and its parameters estimation using genetic algorithms

The article presents the process of creating a water supply network model with emphasis on the calibration phase. Calibration was performed using genetic algorithms. The calibration data were obtained from the measurement system installed on real waterworks.

Keywords: modeling, EPANET, genetic algorithms, waterworks, water supply network

dr hab. inż. Włodzimierz Stanisławski, prof. PO

Studia i doktorat na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej. Habilitacja na Uniwersytecie Elektrotechnicznym w Sankt-Petersburgu. Od 2003 r. stanowisko profesora Politechniki Opolskiej. Kieruje Katedrą Informatyki. Zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia związane z modelowaniem i symulacją komputerową złożonych obiektów sterowania, a w szczególności bloków energetycznych. Od 1 września 2008 r. pełni funkcję prodziekana Wydziału ds. naukowych.

e-mail: w.stanislawski@po.opole.pl



mgr inż. Marcin Zmarzły

Śluchacz studiów doktoranckich w dyscyplinie Automatyka i Robotyka na Politechnice Opolskiej. Prowadzi prace badawcze w zakresie identyfikacji sieci wodociagowych oraz wykorzystania metod sztucznej inteligencji w diagnostyce i sterowaniu pomp i pompowni.

e-mail: marcin@zmarzly.com.pl

